

УДК 669.14.018.295:621.791.051.6

**М. В. Голубева, Г. Д. Мотовилина, Е. В. Святышева, О. В. Сыч**

«Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов  
«Прометей» имени И. В. Горынина Национального исследовательского центра  
«Курчатовский институт»

*npk3@crism.ru*

## ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ В СТАЛИ МАРКИ 09ХГН2МД ПОСЛЕ ТЕРМОУЛУЧШЕНИЯ

Проведены исследования структурных изменений в зависимости от режимов высокого отпуска образцов листового проката из новой стали марки 09ХГН2МД. Установлены особенности формирования структуры и карбидообразования, влияющие на уровень механических свойств.

*Ключевые слова:* высокопрочная сталь, высокий отпуск, структура, мартенсит, бейнит, карбиды, механические свойства.

***M. V. Golubeva, G. D. Motovilina, E. V. Svyatysheva, O. V. Sych***

## STRUCTURAL FEATURES OF STEEL 09CrMnNi2MoCu (09HGN2MD) AFTER HEAT TREATMENT

Structural changes depending on high tempering modes rolled plates from the new steel 09CrMnNi2MoCu (09HGN2MD) were investigated. Specific features of the formation of structure and carbide formation affecting the level of mechanical properties are established.

*Keywords:* high-strength steel, high tempering, structure, martensite, bainite, carbides, mechanical properties.

В последние годы для строительства атомных ледоколов, морских средств добычи полезных ископаемых, тяжелонагруженной техники и пр. созданы низкоуглеродистые хромоникельмолибденовые с пределом текучести до 800 МПа [1, 2].

Для широкого класса сталей хромоникельмолибденовой композиции легирования в процессе закалки формируется структура с мартенситом реечного и высокотемпературного нереечного типа, а также с небольшой долей бейнита реечного и гранулярного типа [1, 3, 4]. Определенный интерес представляет проведение исследований структурных изменений в стали с экономным легированием в зависимости от режимов высокого отпуска для достижения требуемого уровня прочности в сочетании низкотемпературной ударной вязкостью.

Целью настоящей работы являлось исследование влияния особенностей формирования структуры в новой высокопрочной хладостойкой стали с суммарным содержанием легирующих элементов Cr, Ni, Cu и Mo не более 3 %.

### Материал и методика проведения эксперимента

Исследования проводились на новой высокопрочной хладостойкой стали марки 09ХГН2МД с Сэкв. ≤ 0,53 %, табл. 1.

Таблица 1

Химический состав стали марки 09ХГН2МД, % масс.

C	Si	Mn	Ni+Cu	Cr+Mo	V+Nb	Al	Ti	Sn	N	S	P
0,09	0,30	0,70	2,20	0,80	0,027	0,04	0,004	0,002	0,006	0,003	0,007

Исследования структуры металла просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ)\* проводили на образцах после термоулучшения – закалка от температуры 950 °С в воду и последующий отпуск в течение 180 минут при температурах 570, 600, 630 и 690 °С.

Подробный анализ структуры проводили с применением просвечивающего электронного микроскопа FEI Tecnai G2 30 S-TWIN, оснащенного рентгеновским энергодисперсионным спектрометром. Образцы в виде тонких фольг исследовали при ускоряющем напряжении 200 кВ. Механические испытания стали на растяжение проводили по ГОСТ 1497–84, на ударный изгиб при температуре –70°С по ГОСТ 9454–78.

### Результаты исследования и их обсуждение

Структурные исследования показали, что в процессе закалки в стали формируется бейнитно-мартенситная структура. Мартенситная составляющая представляет собой дислокационный мартенсит реечного типа (РМ – до 45 %) с прослойками остаточного аустенита ( $A_{ост}$ ) по границам реек и высокотемпературный мартенсит нереечного типа (ВМ – до 25 %) с карбидами цементита самоотпуска внутри кристаллитов. Бейнитная составляющая представлена преимущественно бейнитом реечной морфологии (РБ – до 35 %) с карбидными выделениями по границам реек. В структуре стали также присутствует до 5 % гранулярного бейнита (ГБ) с мелкими карбидами цементита внутри и крупными карбидами вытянутой формы по границам отдельных кристаллитов. По

\* Экспериментальные исследования выполняли на оборудовании Центра коллективного пользования научным оборудованием «Состав, структура и свойства конструкционных и функциональных материалов» НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей» при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки в рамках соглашения № 14.595.21 0004.

отдельным границам реек в РБ встречаются прослойки мартенситно-аустенитной составляющей, или МА-фазы [5] (табл. 2).

Таблица 2

Результаты структурного анализа образцов после закалки

Характеристика компоненты		Компоненты структуры			
		РМ	ВМ	РБ	ГБ
Объёмная доля, %		40–45 %	20–25 %	30–35 %	2–5 %
Средний размер реек (фрагментов), мкм		0,27	1,62	0,72	1,50
Плотность дислокаций, $\times 10^{14} \text{ м}^{-2}$		21	21	2,8	2,6
Карбиды на границах, нм		300 ( $A_{\text{ост}}$ )	150	210	200
Частицы внутри зёрен	Размер, нм	10	200	–	70
	Об. плотн., $\times 10^{20} \text{ м}^{-3}$	0,01	0,06	–	–

*Отпуск при температуре 570 °С* приводит к снижению плотности дислокаций в мартенситной составляющей (до  $3,1 \times 10^{14} \text{ м}^{-2}$  в РМ и до  $2,0 \times 10^{14} \text{ м}^{-2}$  в ВМ), к росту карбидов самоотпуска внутри кристаллитов ВМ, появлению дисперсных карбидных выделений внутри и протяженных пластинчатых цементитных карбидов на границах отдельных реек РМ, где ранее были обнаружены прослойки  $A_{\text{ост}}$  (рис. 1, а, б). Перестройка бейнитных кристаллитов менее значительна (рис. 1, в, г). При неизменной плотности дислокаций наблюдается формирование крупных карбидов у границ кристаллитов РБ на месте МА-фазы (рис. 1, в). Формирование такой структуры обеспечивает получение в стали предела текучести 795 МПа, относительного удлинения 18,5 % и ударной вязкости при температуре минус 70 °С 140 Дж/см<sup>2</sup>.

*Повышение температуры отпуска до 600 °С* почти не оказывает влияния на плотность дислокаций в мартенсите, но примерно в 1,5 раза снижает её в бейните. За счет усиления диффузии углерода по границам ВМ и на прилегающих к ним границах РМ и РБ образуются множественные карбиды с меньшим средним размером. В РМ наблюдается полигонизация дислокаций внутри реек и диссоциация отдельных незакрепленных карбидами границ. Данные структурные изменения способствуют повышению значений предела текучести до 805 МПа, относительного удлинения до 19,7 % и ударной вязкости при температуре минус 70°С до 167 Дж/см<sup>2</sup>.

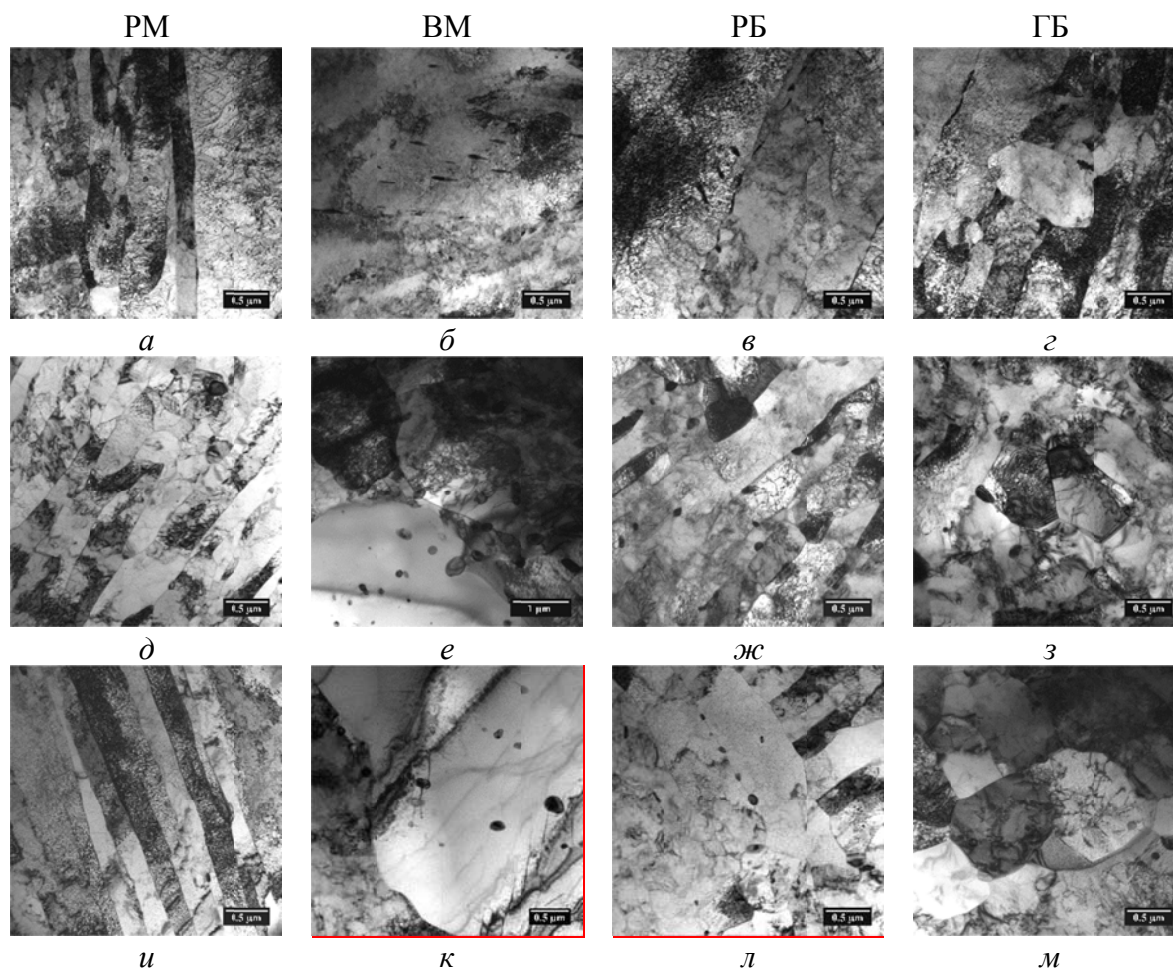


Рис. 1. Структурные составляющие стали марки 09ХГН2МД после закалки от температуры нагрева 950 °С и последующего отпуска при температурах 570 °С (а–г), 630 °С (д–з) и 690 °С (и–м), где: а, д, и – РМ; б – ВМ; к, о – ПМ; в, ж, л – РБ; г, з, м – ГБ

При повышении температуры отпуска до 630 °С на месте отдельных областей дислокационного мартенсита нереечного типа происходит образование и рост областей переотпущенного мартенсита – практически бездислокационных областей  $\alpha$ -фазы, упрочненных карбидами (рис. 1, е). По границам кристаллитов РБ и ГБ образуются множественные карбиды цементитного типа, легированные Mn и Cr (рис. 1, ж, з). Данные структурные изменения приводят к снижению значений предела текучести до 742 МПа, относительного удлинения до 19,2 % и к повышению значений ударной вязкости при температуре минус 70 °С до 180 Дж/см<sup>2</sup>.

При температуре отпуска 690 °С процессы коагуляции и роста карбидов усиливаются (рис. 1, и, к, л, м), а также ускоряются процессы диффузии легирующих элементов (прежде всего Cr и Mn) из матрицы в карбидную фазу. Это приводит к существенному снижению предела текучести до 523 МПа, росту относительного удлинения до 25,3 % и ударной вязкости при температуре испытаний –70 °С до 282 Дж/см<sup>2</sup>.

## Выводы

Проведенные исследования новой экономнолегированной хладостойкой стали показывают, что:

- отпуск при температуре 570 °С приводит к существенному снижению плотности дислокаций в ВМ и РМ и появлению карбидных выделений в РМ на местах, где ранее были обнаружены прослойки  $A_{ост}$ ;

- отпуск при температуре 600 °С приводит к существенному снижению плотности дислокаций не только в мартенситной, но и в бейнитной составляющей, а также к образованию множественных карбидов с меньшим средним размером в РМ и РБ, что обеспечивает получение повышенной прочности, близкой к закаленному состоянию, в сочетании с высокими значениями вязко-пластических характеристик;

- отпуск при 630 °С и выше способствует образованию на месте отдельных областей дислокационного мартенсита практически бездислокационных областей  $\alpha$ -фазы, упрочненных карбидами, и их росту, а также к легированию карбидов цементита Mn и Cr, что приводит к понижению прочностных характеристик при одновременном повышении пластичности и вязкости стали в 1,5 раза.

Проведенные исследования позволяют определить оптимальные параметры отпуска для обеспечения требуемых прочностных и вязко-пластических характеристик в листовом прокате из стали категории прочности 690 (09ХГН2МД).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Рыбин В. В. Высокопрочные свариваемые стали / В. В. Рыбин, В. А. Малышевский, Е. И. Хлусова. Санкт-Петербург : Изд-во Политехн. ун-та, 2016. 212 с.
2. Голосиенко С. А. Возможности повышения прочностных характеристик экономнолегированных высокопрочных сталей за счет образования наноразмерных карбидов / С. А. Голосиенко, Г. Д. Мотовилина, Е. И. Хлусова // Вопросы материаловедения. 2010. № 3 (59). С. 52–64.
3. Семичева Т. Г. Процессы карбидообразования и хрупкость при отпуске судостроительной стали / Т. Г. Семичева, Е. И. Хлусова, Л. Г. Шерохина // Вопросы материаловедения. 2005. № 2 (42). С. 69–78.
4. Голосиенко С. А. Влияние структуры, сформированной при закалке на свойства высокопрочной хладостойкой стали после отпуска / С. А. Голосиенко, Г. Д. Мотовилина, Е. И. Хлусова // Вопросы материаловедения. 2008. № 1 (53). С. 32–44.
5. Bhadeshia H. K. D. H. Bainite in steels – Transformation, Microstructure and Properties. 2nd ed.. London : IOM Communications, 2002. P. 450.